

## Inferência *fuzzy* na análise de vulnerabilidade de fragmentos florestais na Amazônia mato-grossense

Thales Vaz Penha<sup>1</sup>  
Leila Maria Garcia Fonseca<sup>1</sup>  
Thales Sehn Korting<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{thales.penha, thales.korting}@inpe.br/ leila@dpi.inpe.br

**Abstract.** The intensity of land use and land cover changes in Mato Grosso state, Brazil, in recent years is mainly due to deforestation process. Driven by the expansion of agriculture and pasture activity, the deforestation process has become increasingly vulnerable for the Amazon ecosystem and its forest fragments. Forest fragmentation could be a process of natural order but it has been intensified by human activities in recent decades, increasing the ecosystems vulnerability. The main problems generated by forest fragmentation are the biodiversity loss, the species isolation and the exposure of forest fragments to forest degradation. In this sense, many researches have been using remote sensing data and techniques to study this processes and its consequence. Furthermore, the geographic inferences analysis through geoprocessing techniques and also the use of landscape metrics can contribute to better understanding the forest fragmentation vulnerability in the Amazon. In this paper, we proposed to build different scenarios of forest fragmentation vulnerability in an Amazon region using fuzzy logic. We used distance maps as a key indicator of vulnerability to forest fragmentation. The results were considered satisfactory from a qualitative point of view, but other applications are needed to construct forest fragmentation vulnerability models more suitable to the local reality.

**Palavras-chave:** fuzzy inference, forest fragmentation, vulnerability, Amazon, inferência fuzzy, fragmentos florestais, vulnerabilidade, Amazônia.

### 1. Introdução

A ocupação intensa da Amazônia começou no início da década de 1970. Embora áreas extensas ainda permaneçam intactas, a taxa de perda da floresta é grande, em especial no “arco do desmatamento”, ao longo das bordas sul e leste da região amazônica. A vastidão de florestas remanescentes significa que os impactos potenciais do desmatamento de forma continuada são muito mais importantes que os já severos impactos que ocorreram até hoje (Fearnside, 2005).

Segundo Becker (2007), as causas do desmatamento na Amazônia são de múltiplas origens, tanto da reprodução do ciclo da expansão pecuária, exploração da madeira, desflorestamento e avanço da fronteira agrícola quanto da agricultura de corte e queima, da agricultura comercial, da exploração seletiva predatória e dos incêndios florestais. Segundo Laurance & Vasconcelos (2009), uma consequência direta e inevitável do desmatamento é a fragmentação florestal, que ocorre à medida que uma grande extensão de floresta é subdividida e diminui de tamanho.

A fragmentação florestal, por mais que seja um processo de ordem natural, tem sido intensificado pela ação humana, nas últimas décadas, aumentando a vulnerabilidade dos ecossistemas. Segundo Lourenço et al. (2013), a vulnerabilidade pode ser definida como uma situação em que o meio físico está vulnerável às pressões humanas. Geralmente, estão presentes três fatores: exposição ao risco, incapacidade de reação e dificuldade de adaptação diante da materialização do risco. Pode ser entendido, portanto, como o grau de susceptibilidade que um fragmento florestal está exposto aos danos físicos ou degradação devido a sua fragilidade.

Dentre os principais problemas gerados pela fragmentação florestal está a perda de biodiversidade e o isolamento de espécies em habitats inadequados ao desenvolvimento ecossistêmico. Além disso, a exposição dos fragmentos florestais à degradação florestal é um dos principais problemas identificados na Amazônia. Este processo se inicia com a floresta intacta e termina com a conversão completa da floresta original em outras coberturas seguindo a lógica da

degradação progressiva (INPE, 2008). Laurance & Vasconcelos (2009) destacam também que os principais fatores ligados à configuração da paisagem tais como os efeitos de área, de borda, de distância (ou isolamento) e do tipo de matriz afetam as populações de espécies em florestas fragmentadas como na Amazônia o que demanda cada vez mais estudos de áreas fragmentadas.

Segundo Irgang (2007), da área total de 257 mil quilômetros quadrados de remanescentes florestais (fora de Unidades de Conservação e Terras Indígenas) em Mato Grosso, 12% sofrem algum tipo de efeito de borda. As áreas de floresta situadas a mais de 10 quilômetros de distância da borda dos fragmentos, que apresentam maior potencial para a conservação, são limitadas e concentradas em algumas porções da área de estudo. Em função disso, instrumentos de políticas públicas para a conservação, terão que priorizar a conservação dessas áreas e a recomposição da conectividade da paisagem.

Neste sentido, Cerqueira (2003) apud Garcia e Francisco (2013) salienta que as alterações ocorridas na qualidade dos habitats são causadas por condições inerentes ao processo de fragmentação e que podem ser medidas por métricas da paisagem, tal como o efeito da distância entre os fragmentos, ou o grau de isolamento; o tamanho e a forma do fragmento; o tipo de matriz circundante e o efeito de borda. Estas métricas da ecologia da paisagem quando integradas as ferramentas de geoprocessamento oferecem um leque de possibilidades de análises espaciais e a extração de informações pertinentes sobre o estado dos fragmentos florestais. Além disso, técnicas de inferência espacial podem auxiliar estes estudos ao gerar cenários de riscos ou vulnerabilidade à fragmentação florestal.

O objetivo deste estudo consiste em construir diferentes cenários de vulnerabilidade de fragmentos florestais à degradação florestal em uma região pertencente à Amazônia mato-grossense por meio de inferência *fuzzy*. Identificando os fragmentos florestais a partir dos dados do PRODES-INPE e definindo os principais indicadores de vulnerabilidade à fragmentação florestal em função da proximidade aos fatores de risco.

## 2. Inferência espacial por lógica *fuzzy*

A análise espacial de dados geográficos é um método de investigação que permite mensurar propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno em estudo. Esta abordagem é composta por um conjunto de procedimentos encadeados cuja finalidade é a escolha de um modelo inferencial que considera explicitamente o relacionamento espacial presente no fenômeno (Câmara et al, 2004). Dentre as diferentes abordagens de análise espacial está a inferência por lógica *fuzzy* cujo resultado é um dado matricial de superfície contínua que pode ser útil em tomadas de decisão ao criar diferentes cenários de risco, susceptibilidade e vulnerabilidade.

Na inferência espacial, existem vários operadores *fuzzy* que permitem a combinação de diferentes mapas para a geração de cenários. O operador *fuzzy gamma* permite relacionar mapas a partir da combinação entre a soma algébrica *fuzzy* e o produto algébrico *fuzzy* ajustado por um coeficiente *gamma* que representa o valor de pertinência *fuzzy* para cada mapa que será combinado, como ilustrado na Figura 1.

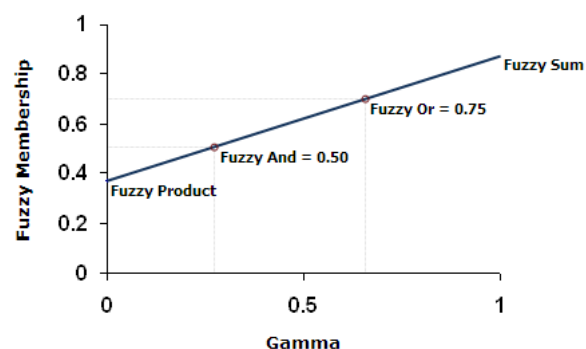


Figura 1: Operador *fuzzy gamma* e seus graus de pertinência. Fonte: Arcgis for desktop 10.3.

A flexibilização do valor *fuzzy gamma* possibilita a construção de cenários e tendências de graus de pertinência a uma determinada classe. Cenários menos restritivos são gerados quando houver a maximização da soma algébrica *fuzzy* e tendência de cenários mais restritivos quando houver a maximização do produto algébrico *fuzzy*. Isto é, quando *gamma* foi igual a zero, os valores de saída serão resultado do produto algébrico *fuzzy* e quando o *gamma* for igual a 1, os valores de saída serão a soma algébrica *fuzzy* (Escada, 1998).

### 3. Materiais e Métodos

A área de estudo (Figura 2) compreende a órbita-ponto 228-067 do sensor OLI do satélite Landsat 8. Essa cena localiza-se ao norte do estado do Mato Grosso (MT), no domínio ecossistêmico da Amazônia, e a cena está contida no chamado Arco do Desflorestamento – região também da fronteira agropecuária Mato-grossense. As coordenadas geográficas do centroide da cena são  $57^{\circ}29'23.240''$  W e  $10^{\circ}07'08,524''$  S.

A cena abrange parte de oito (8) municípios: Apiacas, Paratáina, Nova Bandeirantes, Nova Monte Verde, Cotriguaçu, Juruena, Alta Floresta e Juara. O surgimento destes municípios está relacionado à abertura de estradas, principalmente após a construção da BR 163 (Cuiabá-MT-Santarém-PR), e aos investimentos em infraestrutura nos anos 70. Eles possuem como principais atividades econômicas a agricultura, a pecuária e as atividades extrativistas. O município de Alta floresta destaca-se como a principal cidade da região, sendo referência na oferta de serviços e comércio.

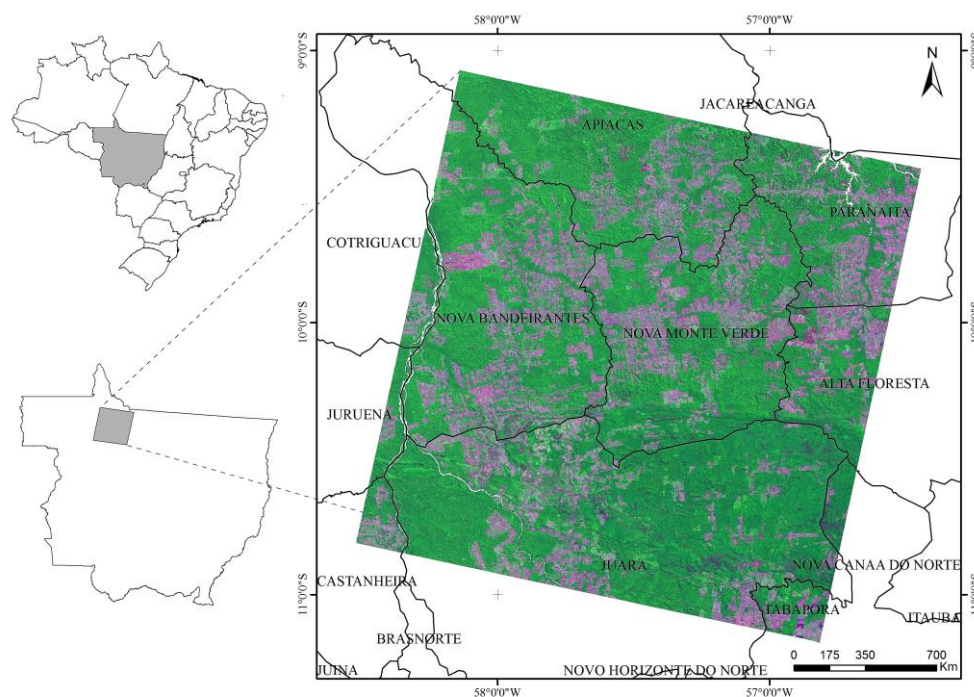


Figura 2: Localização da área de estudo: cena Landsat 8 órbita-ponto 228-067.

A metodologia do trabalho é dividida em seis partes: (i) definição das classes “fragmentos florestais”; (ii) agrupamento dos polígonos e compatibilização dos dados; (iii) transformação dos dados de entrada em grades regulares e geração dos mapas de distância; (iv) normalização de todos os dados para a aplicação da inferência *fuzzy*; (v) criação das classes de vulnerabilidade. As etapas executadas no trabalho foram elaboradas conforme o fluxograma (Figura 3).

Inicialmente, foram levantados os dados vetoriais de malha viária e áreas urbanas do estado de Mato Grosso adquiridos no portal da Secretaria de Estado de Planejamento de Mato Grosso (SEPLAN, 2016); os dados vetoriais dos limites municipais e do estado foram adquiridos no portal

do IBGE (2016); os dados de focos de calor referentes ao ano de 2015 foram obtidos no projeto QUEIMADAS (2016); e os dados de desmatamento (referentes ao ano 2015) bem como a imagem Landsat 8 foram adquiridos no portal do projeto PRODES (2016).

Na primeira etapa, foram definidas as classes de uso e cobertura da terra “floresta” e “desflorestamento” do arquivo vetorial do PRODES-INPE, as classes “fragmentos florestais” – com base no cálculo de métrica de densidade de borda – e “desflorestamento recente” – com bases nos desmatamentos verificados nos anos de 2013, 2014 e 2015. Densidade de borda (DB) é uma métrica de estrutura da paisagem importante que pode evidenciar a complexidade de diferentes habitats em uma perspectiva positiva ou também pode revelar aspectos de fragmentação da paisagem numa perspectiva negativa (Lang et al., 2009). O cálculo é feito a partir de uma razão entre a extensão de borda e área de um fragmento expressa em metros/hectare no qual quanto maior o valor de DB maior também é o efeito de borda e conseqüentemente mais maléfico para os fragmentos (Calegari et al., 2010). Após análise exploratória, adotou-se como limiar valores maiores que 30 para definição da classe fragmentos florestais.

A definição da classe “desflorestamento recente” teve como princípio a ideia de que os desflorestamentos mais recentes representam maior risco aos fragmentos florestais que desmatamentos já consolidados. Desta forma, optou-se por utilizar apenas os polígonos de desflorestamento referentes aos anos de 2013, 2014 e 2015 para a área de estudo.

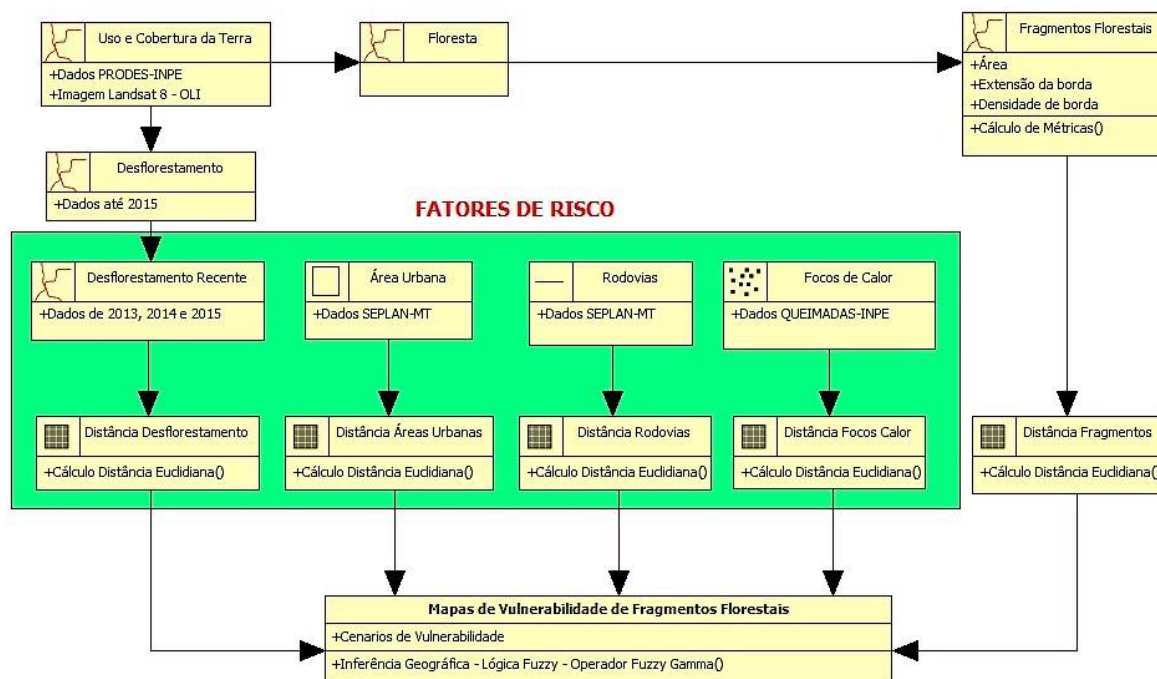


Figura 3: Fluxograma das etapas do trabalho.

Na etapa seguinte, foi realizado o agrupamento dos polígonos com limite em comum das classes “Fragmentos florestais” e “Desflorestamento recente”. Além disso, o recorte de todos os dados vetoriais de entrada para os limites da cena Landsat órbita-ponto 228-067 foi realizado e os dados para mesma projeção e *datum* de referência (UTM SAD 69 - zona 21-sul) foram compatibilizados. Os dados iniciais são exibidos na Figura 4.

Em seguida, os dados de entrada foram transformados em grades regulares (resolução espacial padrão de 30 metros). Foram gerados os mapas de distância (Figura 5) para cada um dos indicadores de vulnerabilidade com base no cálculo de distância euclidiana, a saber: (a) Mapa de distância as bordas dos fragmentos; (b) Mapa de distância das áreas desflorestadas; (c) Mapa de distância das rodovias; (d) Mapa de distância das áreas urbanas; (e) Mapa de distância dos focos de calor.



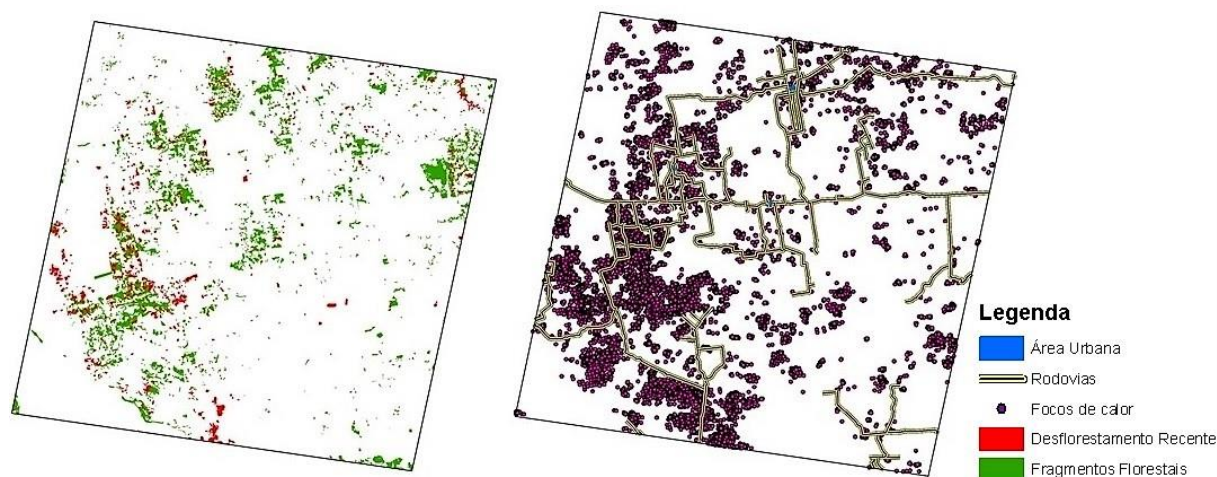


Figura 4: Dados de entrada do projeto.

Posteriormente, a fim de padronizar os valores de entrada do operador *fuzzy gamma*, o reescalonamento (normalização) dos valores máximo e mínimos (variação de 0 a 1) dos mapas de distância, através da aplicação de transformação linear, foi realizado. Nesta etapa, a transformação linear converte os valores de maiores distâncias para valores próximos a 1 enquanto os valores de menores distâncias para valores próximos a zero.

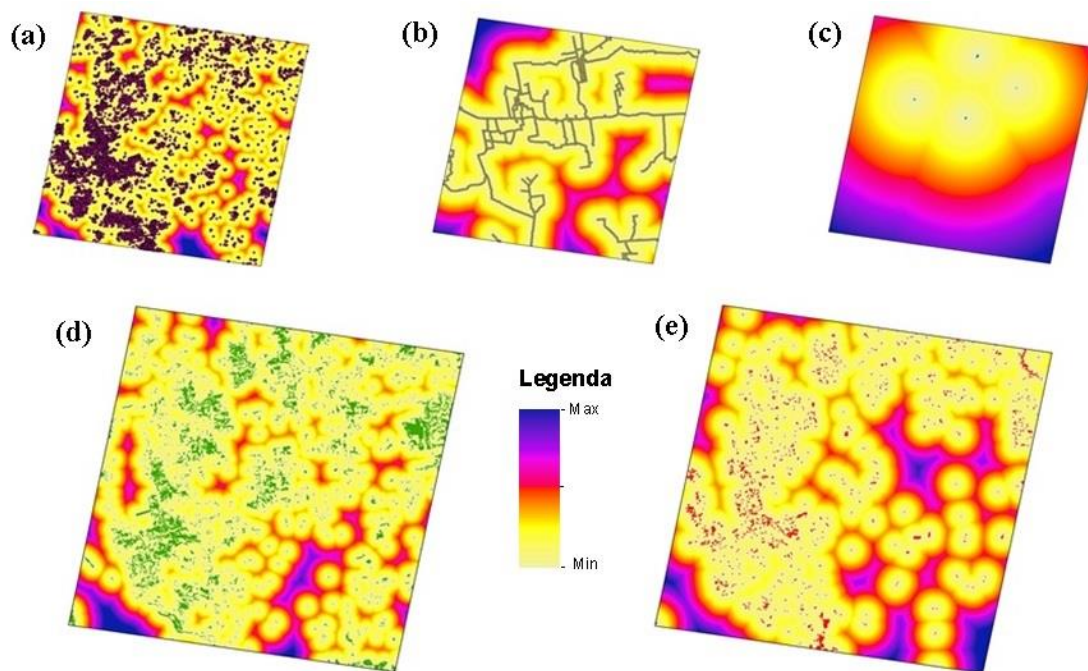


Figura 5: Mapas de distância: (a) distância dos focos de calor; (b) distância das rodovias; (c) distância das áreas urbanas; (d) distância as bordas dos fragmentos; (e) distância das áreas desflorestadas.

Definiu-se também conceitualmente que para os fatores de risco quanto mais próximos estes estão dos fragmentos, maior é o grau de vulnerabilidade. No caso dos fragmentos florestais a ideia é inversa, quanto mais distante estão os fragmentos dos fatores de risco melhor, logo, as maiores distâncias euclidianas deveriam estar mais próximas de 0 e as menores distâncias próximas a 1. Para os dados de entrada para a inferência *fuzzy* ficarem coerentes, aplicou-se também a equação de transformação linear inversa para os valores máximos (0) e mínimos (1) no mapa de distância dos fragmentos florestais, conforme a expressão (equação 1) a seguir:








$$(-1 * \text{"mapa de distância dos fragmentos florestais"}) + 1 \quad (1)$$

Após a normalização de todos os dados matriciais de distância para valores entre 0 e 1, realizou-se a inferência *fuzzy* com a aplicação do operador *fuzzy gamma* para construção dos cenários de vulnerabilidade dos fragmentos, conforme a expressão (equação 2):

$$\mu = (\text{soma algébrica } Fuzzy)^{\gamma} * (\text{produto algébrico } Fuzzy)^{1-\gamma}, \quad (2)$$

onde  $\gamma$  é um valor escolhido entre 0 e 1. Os valores de *gamma* utilizados foram escolhidos de forma arbitrária. Inicialmente, foram escolhidos valores de *gamma* bem distribuídos entre 0 e 1. No entanto, notou-se que valores muito baixos do coeficiente *gamma* ( $< 0.5$ ) não representavam informações novas sobre o problema analisado. Desta forma, os seguintes valores para *gamma* foram definidos: 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9. Por fim, o fatiamento dos mapas foi realizado e as classes de vulnerabilidade foram definidas conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Classes de vulnerabilidade e legenda

Valores de Fatiamento	Classes	Legenda
0,0 - 0,15	Extremamente Vulnerável	
0,15 - 0,30	Muito vulnerável	
0,30 - 0,45	Moderadamente Vulnerável	
0,45 - 0,60	Medianamente Vulnerável	
0,60 - 0,70	Pouco Vulnerável	
0,70 - 0,80	Minimamente Vulnerável	
0,8 - 1,0	Não Vulnerável	

#### 4. Resultados e Discussão

Após a aplicação do operador *fuzzy gamma* e a definição das classes de vulnerabilidade por meio de fatiamento, os mapas temáticos, com a representação matricial para cada valor de *gamma* nos limite da área de estudo, foram definidos. Os cenários de vulnerabilidade criados após aplicação do operador *fuzzy*, com diferentes valores de *gamma* são apresentados na Figura 6. A Tabela 2 apresenta a proporção de cada classe na área de estudo, de acordo com os valores *gamma* utilizados.

Tabela 2: Proporção de classe/valor de *gamma* em porcentagem para a área de estudo.

Classes	<i>Gamma</i> 0.5	<i>Gamma</i> 0.6	<i>Gamma</i> 0.7	<i>Gamma</i> 0.8	<i>Gamma</i> 0.9
Extremamente Vulnerável	99,91%	98,40%	92,30%	54,72%	1,55%
Muito vulnerável	0,09%	1,60%	7,50%	39,71%	23,69%
Moderadamente Vulnerável	-	-	0,20%	5,42%	53,89%
Medianamente Vulnerável	-	-	-	0,15%	18,81%
Pouco Vulnerável	-	-	-	-	2,04%
Minimamente Vulnerável	-	-	-	-	0,02%
Não Vulnerável	-	-	-	-	-

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que para cada um dos valores de *gamma* os cenários apresentaram uma tendência. Os menores valores de *gamma* indicam um cenário mais pessimista (áreas mais vulneráveis) enquanto os valores mais altos de *gamma* indicam cenários menos restritivos (áreas com grau de vulnerabilidade menor).

Na Figura 6 (a), (b) e (c) há o predomínio da classe “Extremamente Vulnerável” (99,91%, 98,40% e 92,30% respectivamente) o que representa um cenário extremamente restritivo, ou seja, a proximidade dos fragmentos florestais aos indicadores de vulnerabilidade é tal que o operador considera que para as distâncias calculadas a influência destes fatores representa um elevado grau de risco para os fragmentos. Nos cenários cujos valores *gamma* são correspondentes a 0.8 e 0.9 (Figura 6 (d) e (e)), ocorrem quatro classes e seis classes de vulnerabilidade respectivamente, com percentuais mais bem distribuídos entre as classes e com uma tendência ao surgimento áreas menos vulneráveis, vide Tabela 2.

Constatou-se também que para valores *gamma* mais próximos a zero há o predomínio de menos classes de vulnerabilidade. Para os cenários cujos valores *gamma* são mais próximos de 1 (um) há maior variabilidade das classe de vulnerabilidade. Isto evidencia que o operador é mais sensível as variáveis de risco quando os valores de *gamma* são altos, ou seja, quanto maior o *gamma* mais a relação distância *versus* indicadores de vulnerabilidade torna-se menos pertinente.

Desta forma, verificou-se que a maior parte da área estudada encontra-se na classe “Extremamente Vulnerável” quando o valor de *gamma* tende a zero. Esta ocorrência pode ser explicada pelo fato de que produto algébrico recebeu maior grau de pertinência. desta forma, o operador *fuzzy* ao realizar os cálculos de multiplicação para os diversos números menores que 1 (um) acaba gerando valores de saída sempre menores ou iguais ao menor valor do membro *fuzzy* – criando cenários mais “restritivo” do ponto de vista ambiental. É importante salientar que a proximidade espacial dos fatores de risco ou indicadores de vulnerabilidade para a área de estudo em questão tende a apresentar naturalmente cenários mais pessimistas quanto à vulnerabilidade dos fragmentos florestais, uma vez que, muitos destes fatores ocorrem muito próximos aos fragmentos, sendo assim, uma região com alto grau de vulnerabilidade.

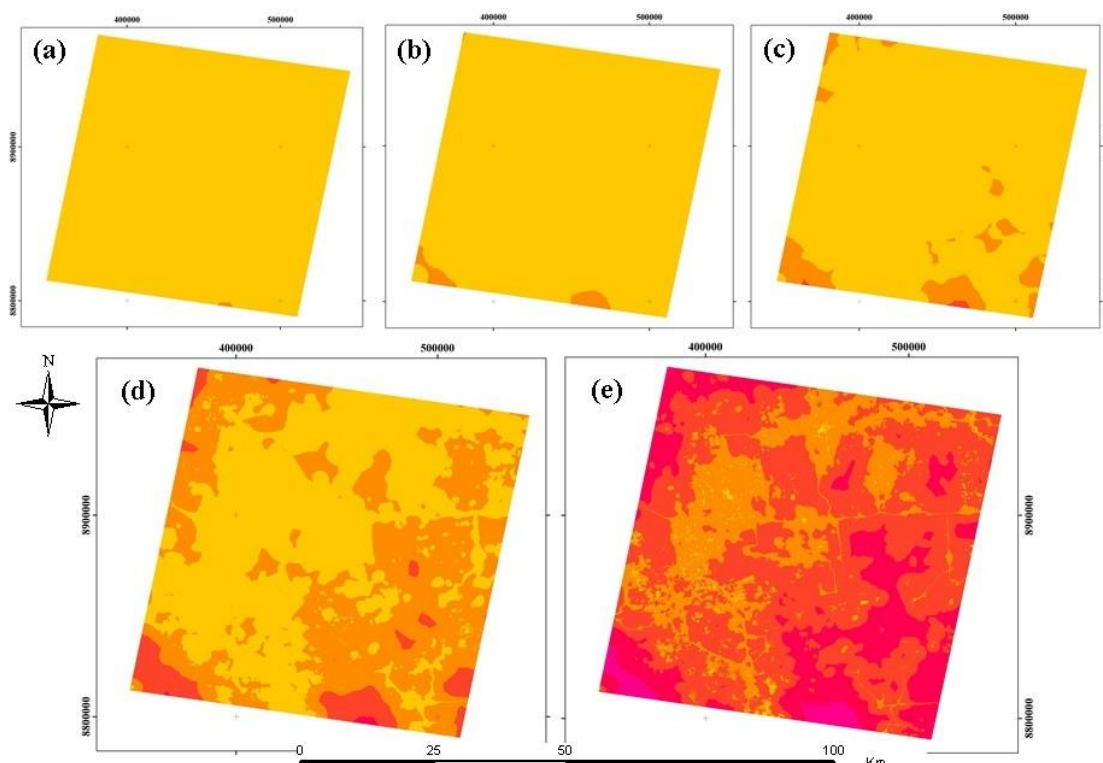


Figura 6: Cenário de vulnerabilidade com os valores: (a) *gamma* 0.5; (b) *gamma* 0.6; (c) *gamma* 0.7; (d) *gamma* 0.8; (e) *gamma* 0.9.

## 5. Conclusões

O operador *fuzzy gamma* gerou diferentes cenários de vulnerabilidade dos fragmentos florestais à degradação florestal que vão do mais favorável (menos restritivo) ao mais desfavorável (mais restritivo), tendo demonstrado, assim, ser flexível aos graus de vulnerabilidade



- considerando os mapas de distância dos indicadores de vulnerabilidade utilizados como dados de entrada do modelo. Uma das vantagens da utilização desta técnica é a possibilidade de gerar diferentes cenários para a tomada de decisão, além de permitir uma melhor exploração dos dados, quando comparado a outros operadores de inferência espacial geográfica.

Entretanto, os resultados obtidos permitiram apenas uma análise qualitativa dos graus de vulnerabilidade, uma vez que não houve a etapa de validação dos resultados. Ainda sim, do ponto de vista da técnica e da metodologia proposta considerou-se os resultados satisfatórios. A escolha dos indicadores de vulnerabilidade não necessariamente representa de forma adequada a realidade local, sendo necessário maior conhecimento do contexto da área de estudo ou a consulta de especialistas. A escolha dos critérios e pesos para cada indicador é outro aspecto a ser considerado.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros a comparação destes resultados obtidos com o operador *fuzzy gamma* com resultados de outros operadores de inferência espacial como a média ponderada zonal. Além disso, propõe-se a cruzamento destes resultados com um mapa de referência ou até mesmo a geração de um mapa de incertezas, o que permitiria uma melhor análise dos resultados obtidos, sendo de grande importância em processos de tomada de decisão.

### Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa no Mestrado em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

### Referências Bibliográficas

- Becker, B. K. **A Amazônia e a política ambiental brasileira**. In: Santos, M. & Becker, B. K. (org.). Território, Territórios: ensaios sobre o ordenamento territorial. Rio de Janeiro: Lamparina, 2007. 3ªed, pg. 22-40.
- Calegari, L.; Martins, S. V.; Gleriani, J. M.; Silva, E.; Busato, L. C. Análise da dinâmica de fragmentos florestais no município de Carandaí, MG, para fins de restauração florestal. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.5, p.871-880, 2010.
- Câmara, G.; Monteiro, A. M. V.; Druck, S.; Carvalho, M S. Técnicas de Inferência Geográfica. In: Druck, S. et al. (Org.). Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 250. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>> Acesso em: junho 2016.
- Escada, M. I. S.. Aplicação de Técnica Fuzzy em SIG como alternativa para o Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE). São José dos Campos: INPE, 1998.
- Feamside, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. **Megadiversidade**, Vol. 1, Nº 1, 2005.
- Garcia, M.L.T., Francisco, C.N. Métricas da paisagem no estudo da vulnerabilidade da Mata Atlântica na região serrana fluminense – Nova Friburgo, RJ. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Cartografia e Geografia. Download. Geociências. Disponível em: <[http://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_geociencias.htm](http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm)>. Acesso em jun. 2016.
- INPE, Instituto de Pesquisas Espaciais. Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites. Sistema PRODES, DETER, DEGRAD e Queimadas 2007-2008. SP: São José dos Campos, 2008a. Disponível em: <[http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio\\_Prodes2008.pdf](http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf)>. Acesso em: maio. 2016.
- Irgang, G. V., Micol, L., Dos Santos, R. R. Análise da fragmentação da paisagem e mapeamento do valor para a conservação : exemplo de aplicação na Amazônia Matogrossense. Cuiabá, Mato Grosso: Instituto Centro da Vida, 2007.
- Lang, S.; Blaschke, T.; Kux, H. **Análise da paisagem com SIG**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 425p.
- Laurance, W. F., Vasconcelos, H. L. Consequências ecológicas da fragmentação florestal na Amazônia. **Oecologia Brasilienses**, vol. 13(3) 2009: 434-451.
- Lourenço, J. C.; Alencar, J. L.; Vasconcelos, R. F. V.; Vale, Y. M. A. L. Identificação de fatores de vulnerabilidade ambiental na floresta do Louzeiro em Campina Grande-PB. **Polêm!ca**, v. 12, p. 274-283, 2013.
- PRODES, Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>> Acesso em jun. 2016.
- QUEIMADAS, Programa de Monitoramento de Queimadas. Monitoramento de focos. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>>. Acesso em jun. 2016.
- SEPLAN, Secretaria de Estado de Planejamento de Mato Grosso. Mapas 1.500.00. Disponível em: <[http://www.seplan.mt.gov.br/-/3952013-dsee-mapas-1.500.000?ciclo=cv\\_gestao\\_inf](http://www.seplan.mt.gov.br/-/3952013-dsee-mapas-1.500.000?ciclo=cv_gestao_inf)> Acesso em jun. 2016.